

## 工程与应用

## 机群协同空战中的指控系统建模与分析

陈 军,高晓光

CHEN Jun,GAO Xiao-guang

西北工业大学 电子信息学院,西安 710072

School of Electronics and Information,Northwestern Polytechnical University,Xi'an 710072,China

CHEN Jun,GAO Xiao-guang.Modeling and analysis of command and control system in cooperative air combat.Computer Engineering and Applications,2009,45(10):195-198.

**Abstract:** For analyzing the performance of command and control system in group-craft cooperative air combat,a tree structure of command and control system is built and evaluative indexes of performance are put forward.Two models of command and control system,one has airborne warning and control system and another has not,are respectively built based on stochastic Petri net.The simulation analysis shows that the command and control system based on airborne warning and control system can lighten the task burden of fighters and fully exert the capacity of beyond visual range air combat of weapons,and proves that stochastic Petri net can analyze the shortcoming and bottleneck and provide reference for system design and improvement.It is an effective analysis approach for describing command and control problem in group-craft cooperative air combat.

**Key words:** group-craft cooperative air combat;command and control;stochastic Petri net;modeling

**摘 要:**为对机群协同空战指挥控制系统性能进行分析,建立了树型机群指挥控制系统组织结构,并提出了性能评价指标。运用随机 Petri 网技术分别建立了有预警机指挥和无预警机指挥的机群协同空战指挥控制系统模型。仿真分析表明,基于预警机的机群指挥控制系统可减轻作战飞机的任务负担,且能充分发挥机载武器的超视距作战能力;也证明了随机 Petri 网技术能够分析指挥控制系统的性能缺陷和瓶颈,从而为系统的设计和改进行有力的支撑,是描述机群协同空战指挥控制系统问题的一种有效方法。

**关键词:**机群协同空战;指挥控制;随机 Petri 网;建模

**DOI:**10.3778/j.issn.1002-8331.2009.10.059 **文章编号:**1002-8331(2009)10-0195-04 **文献标识码:**A **中图分类号:**TP391.9

机群协同空战是随着现代超视距空战的出现而产生的,它是指遂行任务的作战飞机编队在统一指挥下,各编队和编队内友机间进行相互支援、保障和掩护,通过共享战场信息和进行战术、火力的合理配置,以整体力量完成任务的空战方式。先敌发现、先敌攻击是机群协同空战追求的目标,而机群指挥控制系统的性能则是实现上述目标的关键因素之一。但由于系统的复杂性和技术保密等原因,国内外关于机群协同空战指挥控制系统领域的研究文献较少,文献[1]提出了协同空战指挥控制系统的概念和结构框架。文献[2]介绍了美军一种 Eagle Vision 空军作战指挥控制系统模型,但没有给出具体的分析过程。

Petri 网是描述具有分布、并发、异步特征的系统的一种有效工具<sup>[3]</sup>。经过 40 多年不断充实与完善,Petri 网凭借其严格的数学定义以及有效的分析方法已被应用于一些指挥控制系统的性能分析领域<sup>[4-5]</sup>。因此,将 Petri 网技术运用于机群协同空战指挥控制系统的建模和性能分析,以期系统的设计和改进行有力的支撑。

## 1 随机 Petri 网

### 1.1 Petri 网(PN)

**定义 1**  $PN=(P,T,F,M)$ 为 Petri 网,其中:

$P=(P_1,P_2,\dots,P_n)$ ,库所(place)的集合。一般用来描述模型的输入和输出变量,或者模型的状态,用圆圈“○”表示信息或命令在此等待着被处理。

$T=(T_1,T_2,\dots,T_n)$ ,变迁(transition)的集合。一般用来描述模型的算子,或发生的事件,在有条件输出时,变迁还要用来描述约束条件,用短杠“|”表示对位置中的信息或命令按某种方式进行处理。

$F\subseteq(P\times T)\cup(T\times P)$ ,有向弧(arc)的集合。表示库所与变迁的关系,用“ $\leftarrow$ ”“ $\rightarrow$ ”。

$M:P\rightarrow\{0,1,2,\dots\}$ ,初始标识(initial marking),用托肯(token)表示。

库所中托肯的分布代表标识,也就是当前状态。变迁可以根据规则发生,使托肯在网中运动,标识也随之改变。

**基金项目:**国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60774064);西北工业大学青年科技创新基金(No. W016210)。

**作者简介:**陈军(1979-),男,讲师,博士生,主要从事先进航空火力与指挥控制理论研究;高晓光(1957-),女,教授,博士生导师,主要从事航空火力控制原理、航空武器系统作战效能研究。

**收稿日期:**2008-09-22 **修回日期:**2008-11-03

### 1.2 随机 Petri 网 (SPN)

把变迁与随机的指数分布实施延时相联系起来的思想是由 Molly、Florin 和 Natkin 等人独立提出来的<sup>[6]</sup>。

定义 2  $SPN=(PN, \lambda)=(S, T; F, M, \lambda)$  为连续时间 Petri 网,  $\lambda=\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m\}, \lambda_i, i=1, \dots, m$  是变迁  $t_i$  的平均实施速率, 表示在可实施的情况下单位时间内平均实施的次数, 单位是次数/单位时间。平均实施速率的倒数  $\mu_i=1/\lambda_i$  称为变迁  $t_i$  的平均实施延时或平均完成时间, 它是具有指数分布的连续随机变量。

该网的状态标识  $M(\tau)$  的演变在一定条件下形成马尔可夫链 (MC), 即当前的状态仅和前一时刻的状态标识有关。这样, 就可以用一个等价的 MC 来分析  $M(\tau)$  的动态行为。尤其, 当它具有遍历性时, 可以求得稳定情况下的状态概率和系统的流通率, 平均延时等性能度量。

## 2 机群协同空战指挥控制系统结构

### 2.1 树型指挥控制结构

目前, 绝大部分的机群指挥控制系统均采用树型组织结构<sup>[7]</sup>。如图 1 所示, 指挥机或预警机位于机群的顶层, 负责下属各个编队作战任务的分配和协调工作, 其中预警机还可承担战场信息获取的任务; 而位于中间层的编队长机负责部分作战区域任务的指挥, 扮演了协调者的角色; 处于底层是各编队僚机, 他们在编队长机的指挥下, 互相协同完成指定的任务。因此, 机群协同空战的指挥控制是一个多层、多级、多阶段的决策过程。

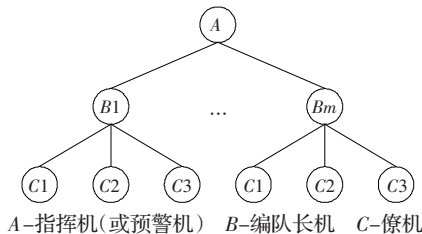


图 1 机群协同空战树型指挥控制结构

### 2.2 指挥控制系统性能评价指标

#### (1) 系统性能瓶颈

机群协同空战中, 每一作战单位即是指挥控制系统的一个节点, 这些节点处理和传输信息的忙闲程度体现了其工作效率。对其进行分析, 可找出整个组织结构中的性能瓶颈。

#### (2) 系统平均延时

系统平均延时是指机群协同空战指挥控制系统对输入的平均响应时间, 通过它可直观的反映不同结构系统性能的优劣。

## 3 机群协同空战指挥控制系统 SPN 模型

机群协同空战指挥控制系统的 SPN 模型中, 每一作战单位对信息的处理都可由一个变迁来表示, 库中所代表信息被处理的状态, 网中库所托肯的分布则代表当前指挥控制进程的状态, 托肯的移动则代表了状态的变化。为便于分析, 本文假设了机群内只有一个双机编队。

### 3.1 无预警机指挥的机群协同空战指控模型

在无预警机指挥的条件下, 指挥机一般由机群中的某一架飞机来承担。机群的指挥控制过程可以分为以下几个阶段: (1) 各僚机对目标机群进行态势评估并向所属编队的长机上报评估结果; (2) 各编队长机将僚机上报的信息与本机的态势评估

结果融合后上传给指挥机; (3) 指挥机根据所有上报的态势评估结果进行威胁评估, 并向编队长机下达目标分配结果; (4) 编队长机根据下达命令, 对目标编队做进一步的目标分配, 并下达给僚机; (5) 编队长机和僚机根据要攻击的目标进行战术规划, 然后进行协同攻击。

图 2 为无预警机指挥的 SPN 模型, 其中变迁  $t_2, t_3, t_4$  分别表示指挥机的态势评估、信息融合及目标分配;  $t_5, t_6, t_7$  分别表示了编队长机的态势评估、目标分配及战术规划;  $t_8, t_9$  表示了僚机的态势评估和规划决策;  $t_{10}$  则表示长机和僚机的协同攻击。

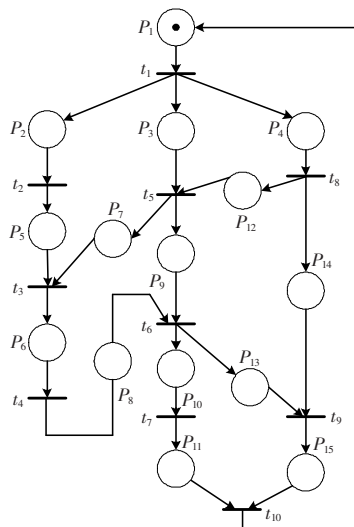


图 2 随机 Petri 网模型 I

### 3.2 有预警机指挥的机群协同空战指控模型

当有预警机指挥时, 机群的指挥控制过程分为以下几个阶段: (1) 预警机来承担整个战场的态势评估, 并对目标机群中各编队进行威胁评估和目标分配; (2) 下属编队飞机则保持电磁静默, 由预警机引导, 直至发现所分配的目标编队; (3) 编队长机对目标编队进行目标分配; (4) 编队长机和僚机进行战术规划, 然后实施协同攻击。

图 3 为有预警机指挥的 SPN 模型, 其中变迁  $t_1, t_2, t_3$  分别表示预警机的空战态势与威胁评估、目标分配及战术导引;  $t_4, t_5$  表示编队长机的目标分配、战术规划;  $t_6$  表示了僚机的战术规划;  $t_7$  则表示长机和僚机的协同攻击。

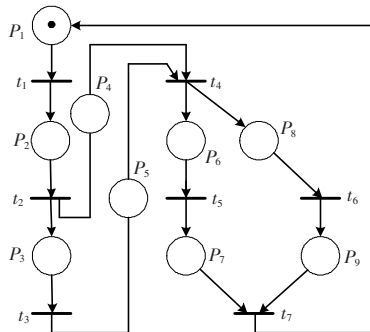


图 3 随机 Petri 网模型 II

## 4 机群协同空战指挥控制系统性能分析

机群协同空战指挥控制过程中每个离散事件的持续时间是随机的, 并且与到达信息量的大小有关, 不同决策事件的持



统性能评价指标。运用随机 Petri 网理论分别建立了有预警机指挥和无预警机指挥的机群协同空战指挥控制系统模型。通过仿真分析表明,随机 Petri 网作为一种系统分析工具,具有直观的图形表示和严格的数学描述,为机群协同空战的指挥控制问题描述提供了一种有效的途径。

### 参考文献:

- [1] 刘金星, 佟明安. 空空协同作战指挥控制系统[J]. 火力与指挥控制, 2001, 26(4): 43-46.
- [2] Levis A H. Time sensitive control of air combat operations[D]. Center of Excellence in Command, Control, Communication, and

Intelligence, George Mason University, 1998.

- [3] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 1998.
- [4] Bowden F D J. Petri nets and their application to command and control systems[D]. Information Technology Division Electronics and Surveillance Research Laboratory(Australia), 1996.
- [5] 罗雪山. C3I 系统理论研究概况[J]. 系统工程与电子技术, 1999, 21(12): 41-46.
- [6] 林闯. 随机 Petri 网和系统性能评价[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [7] 赵晓睿, 高晓光, 陈军. 机群超视距作战联合战术信息系统的效能分析[J]. 火力与指挥控制, 2003, 28(5): 52-55.
- [8] Molly M K. Performance analysis using stochastic Petri nets[J]. IEEE Trans on Computer, 1982, SE-11(9): 913-917.

(上接 162 页)

### 参考文献:

- [1] Li Qiang, Zhang Bo. A fast matching algorithm based on image gray value[J]. Journal of Software, 2006, 17(2): 216-222.
- [2] Song Yi, Cui Ping-yuan, Ju He-hua. A computational optimization method of the SSD and NCC algorithms of the stereo matching[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(2): 45-48.
- [3] Rangarajan A, Duncan J S. Matching point features using mutual information[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2001, 2(6): 110.
- [4] Maes F, Vandermeulen D, Suetens P. Medical image registration using mutual information[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging,

2003, 91(10): 1699-1722.

- [5] vanden Elsen P A, Pol E J D, Viergever M A, et al. Medical image matching—a review of classification[J]. IEEE Engineering in Medical and Biology, 1993, 12(1): 26-39.
- [6] 邵平, 杨路明, 黄海滨, 等. 基于积分图像的快速模板匹配[J]. 计算机科学, 2006, 33(12): 225-229.
- [7] Wu Xue-jing, Zhang Yi-jun, Xia Liang-zheng. A fast recurring two-dimensional entropic thresholding algorithm[J]. Pattern Recognition, 1999, 32(12): 2055-2061.
- [8] 李建明, 万单领, 何荣盛, 等. 一种基于 GPU 加速的图像颜色传递算法[J]. 大连理工大学学报, 2008, 48(2): 287-291.

(上接 175 页)

### 参考文献:

- [1] 尹义龙, 宁新宝, 张晓梅. 自动指纹识别技术的发展与应用[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2002, 38(1): 29-35.
- [2] 漆远, 田捷, 邓翔. 基于遗传算法的指纹图匹配算法及应用[J]. 软件学报, 2000, 11(4): 488-493.
- [3] Hong L, Wan Y, Jain A K. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777-789.
- [4] Sherlock D, Monro D M, Millard K. Fingerprint enhancement by directional Fourier filter[J]. IEE Proceedings of Vision Image and Signal Processing, 1994, 141(2): 87-94.
- [5] 尹义龙, 詹小四, 谭台哲, 等. 基于加博函数的指纹增强算法及其应

用[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 484-489.

- [6] 蒙丽彬, 赵进创, 傅文利. 一种改进的基于 Gabor 滤波的指纹增强算法[J]. 微计算机信息, 2006, 22(11): 297-299.
- [7] Hong L, Wan Y, Jain A K. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(8): 777-789.
- [8] Jain A K, Hong L, Bolle R. Online fingerprint verification[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(4): 302-314.
- [9] Rao A R, Jain R C. Computerized flow field analysis: Oriented texture fields[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(7): 693-709.
- [10] Young I T, Vliet L J. Recursive implementation of the Gaussian filter[J]. Signal Processing, 1995, 44: 139-151.

(上接 183 页)

像的边缘提取工作,但是由于在噪声影响下最小支撑树以及类与类之间的划分界限不那么明显的关系,本文的算法需要保证图像是没有受到无噪声污染的,对于怎样进一步的滤除噪声和提取局部特征还需要进一步的研究。

### 参考文献:

- [1] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [2] 闫敬文. 数字图像处理(Matlab 版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [3] Trahanias P E, Venetsanopoulos A N. Vector order statistics operators as color edge detectors[J]. IEEE Trans Syst Man Cybern Part B: Cybern, 1996, 26(1): 135-143.

- [4] 劳丽, 吴晓明. Maximum weighter entropy clustering algorithm[C]. Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2006: 1022-1025.

- [5] Wieland S C, Brownstein J S. Density-equalizing Euclidean minimum spanning trees for the detection of all disease cluster shapes[J]. PNAS, 2007, 104(22): 9404-9409.
- [6] Ruzon M A, Tomasi C. Edge, junction, and corner detection using color distributions[J]. IEEE Pattern Anal Mach Intell, 2001, 23(11): 1281-1295.
- [7] Theoharatos C, Economou G, Fotopoulos S. Color edge detection using the minimal spanning tree[J]. Pattern Recognition, 2005, 38: 603-606.